

Teemu Urpo

# **LUOKAN D AUDIOVAHVISTIMEN RA- KENTAMINEN JA SOVELTAMINEN KAIUTTIMESSA**

Kandidaatintyö

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Tammikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Teemu Urpo: Luokan D audiovahvistimen rakentaminen ja soveltaminen kaiuttimessa  
Design and implementation of a class D audio amplifier as a part of a portable speaker

Kandidaatintyö, 29 sivua  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikka, TkK  
Tarkastaja: Yliopistolehtori Erja Sipilä  
Tammikuu 2020

---

Tässä työssä suunnitellaan ja toteutetaan luokan D audiovahvistin ja sovelletaan sitä kannettavassa kaiuttimessa. Tarkoituksena on rakentaa tunnettuja kaupallisia kannettavia kaiuttimia muistuttava, mutta monilta osin paranneltu laite. Työn keskiössä on itse toteutettava vahvistin, joka eroaa perinteisistä audiovahvistintyypeistä muun muassa paremmalla hyötysuhteellaan. Laitteeseen toteutetaan myös ladattava akku, Bluetooth-yhteys sekä useita muita hyödyllisiä ominaisuuksia. Osa toiminnallisuudesta, kuten aktiiviset jakosuotimet hankitaan valmiina komponentteina työn laajuuden pitämiseksi kohtuullisena.

Laitteen suunnittelu ja rakentaminen onnistuivat suhteellisen hyvin. Suunnitelmiin tuli pieniä muutoksia toteutuksen edetessä esimerkiksi osien sijoittelussa. Haasteita oli esimerkiksi vahvistinpiirin piirilevyn valmistuksessa, sillä kovin kehittyneitä valmistusmenetelmiä ei ollut saatavilla. Laite kuitenkin saatiin valmiiksi ja haluttu toiminta pystyttiin todentamaan sekä mittaamalla ja kuuntelemalla.

Valmis laite vastasi kohtuullisen hyvin odotuksia. Alussa asetetut vaatimukset muun muassa taajuusvasteelle saavutettiin riittävän hyvin. Elektroniikan puolelta merkittäviä ongelmia ei jäänyt valmiiseen laitteeseen. Koteloinnin ilmapuodot ja materiaalin työstämisessä olleet vaikeudet taas jäivät tulevaisuudessa korjattaviksi epäkohdiksi. Akustinen suunnittelu jäi myös melko pintapuoliseksi. Parempaan lopputulokseen olisi päästy, jos suunnitteluohjelmistosta olisi ollut enemmän kokemusta ja mittausvälineet olisivat olleet saatavilla työn alkuvaiheesta asti. Seuraava kehitysskaskel voisi olla muun muassa ilmatiiviydessä ilmenneiden epäkohtien korjaaminen ja syvällisempi perehtyminen akustiikkaan.

# ALKUSANAT

Idea kannettavan kaiuttimen toteuttamisesta syntyi edellisten omien kaiutinprojektien pohjalta. Olin soveltanut luokan D vahvistinpiirejä jo aiemmin, mutta syvällisempi ymmärrys niiden toiminnasta ja suunnittelusta puuttui. Siksi pidin mielenkiintoisena lähteä toteuttamaan tähän mennessä laajinta kaiutinprojektiani. Tiesin jo aloittaessani, ettei valmis laite tule muiden kurssitöiden tapaan pölyttymään kaapissa, vaan sille olisi myös aktiivista käyttöä esimerkiksi opiskelijatapahtumissa.

Tampereella, 20.1.2020

Teemu Urpo

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
2	KAIUTTIMEN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT .....	2
	2.1 Vahvistin ja virtalähde .....	3
	2.2 Audiosignaalin vastaanotto ja jakosuotimet .....	4
	2.3 Kaiutinelementit ja kotelo .....	5
3	LUOKAN D VAHVISTIN .....	7
	3.1 Toimintaperiaate .....	8
	3.2 Haasteita .....	10
4	VAHVISTIMEN SUUNNITTELU .....	11
	4.1 Kytkenä .....	12
	4.2 Piirilevy .....	13
5	KAIUTINKOTELO .....	15
	5.1 Akustinen suunnittelu .....	16
	5.2 Mallintaminen .....	19
6	TESTAUS JA AKUSTISET MITTAUKSET .....	22
	6.1 Mittausjärjestelyt .....	22
	6.2 Tulokset .....	22
7	YHTEENVETO .....	24
	LÄHTEET .....	26

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	engl. Amplitude Modulation, amplitudimodulaatio
AUX	engl. Auxiliary, kuulokeliitintyyppi
BB/WG	Suomalaisen koivupintaviilun laatuluokitus. BB = tavallinen laatu, WG paik- kaamaton laatu
BMS	engl. Battery Management System, akustonhallintajärjestelmä
CNC	engl. Computer Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus
DSP	engl. Digital Signal Processor, digitaalinen signaaliprosessori
EMI	engl. Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö
I <sup>2</sup> S	engl. Inter-IC Sound, audiolaitteiden yhdistämiseen tarkoitettu sarjaväylä
MDF	engl. Medium-density fibreboard, puolikova kuitulevy
MOSFET	engl. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, Metalli-oksidi- puolijohdekanavatransistori
NiMH	engl. Nickel-metal Hydride, nikkelimetallihydridi
PA	engl. Public Address (system), julkisten tilojen usein suuritehoinen äänen- toistojärjestelmä
PLA	engl. Polylactic Acid, Polylaktidi, mm. 3D-tulostamisessa yleisesti käytetty muovilaatu
USB	engl. Universal Serial Bus, sarjaväyläarkkitehtuuri

# 1. JOHDANTO

Langattoman ja kannettavan äänentoiston suosio on kasvanut viimeisen vuosikymmenen aikana merkittävästi. Erityisesti kannettavat Bluetooth-yhteydellä ja ladattavalla akulla varustetut kaiuttimet ovat yleistyneet [1]. Tämän taustalla on useita tekijöitä. Langattomaan suoratoistoon kykenevät älylaitteet sekä akku- ja vahvistinteknologian kehittyminen ovat esimerkkejä näistä.

Markkinoilla oleville kaupallisille Bluetooth-kaiuttimille tyypillisiä puutteita ovat muun muassa heikko akunkesto ja korjaamisen vaikeus. Ilmoitetut jopa 24 tunnin toistoajat voivat tarkoittaa käytännössä vain muutamia tunteja täydellä äänenvoimakkuudella. Varaosia ei ole usein saatavilla ja vioittuneen laitteen korjaaminen on siten lähes mahdotonta. Myös käytetyt valmistusmateriaalit ovat usein halvan tuntuisia, useimmiten erilaisia muoveja. Lisäksi ulkokäytössä äänenvoimakkuus ei ole usein riittävä ja toisto ei ulotu kovin matalille taajuuksille.

Kandidaatintyön aiheena on suunnitella ja rakentaa edellä mainitut heikkoudet korjaava kannettava kaiutin. Erityisesti huomion kohteena on itse rakennettava luokan D vahvistin, joka yhdessä suurikapasiteettisen litiumioniakun kanssa mahdollistaisi kaupallisia toteutuksia merkittävästi pidemmän toistoajan. Tämän lisäksi suunnitellaan valituille kaiutinelementeille ja tarvittavalle elektroniikalle kotelo. Akustisella suunnittelulla pyritään saavuttamaan matalalle ulottuva bassontoisto ja minimoimaan tarvittava kotelon tilavuus.

Tämän työn alussa luvussa 2 keskitytään erilaisiin vaihtoehtoihin toteuttaa kaiutin ja vertaillaan eri toteutusvaihtoehtojen etuja ja ongelmia. Luvussa 3 syvennyttään tarkemmin luokan D vahvistimen toimintaperiaatteeseen ja sen haasteisiin. Tämän jälkeen luvussa 4 käsitellään toteutuksessa käytettävää vahvistinpiiriä ja sen avulla rakennettavaa vahvistinkytkentää. Laitteen akustiseen puoleen perehdytään syvemmin luvuissa 5 ja 6. Työn lopussa luvussa 7 käydään läpi valmiin laitteen toimivuutta ja tutkitaan asetettujen tavoitteiden täyttymistä.

## 2. KAIUTTIMEN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT

Kaupallisen kaiuttimen kaikki tärkeimmät ominaisuudet sisältävän laitteen rakennus ja suunnittelu olisivat suhteellisen laaja projekti. Useissa laitteissa on esimerkiksi näyttö, graafinen taajuuskorjain ja erilaisia mahdollisuuksia parittaa useita laitteita langattomasti [2]. Projektin laajuus saadaan kohtuulliseksi käyttämällä valmiita osia, esimerkiksi Bluetooth-vastaanotinpiiriä, valmista signaaliprosessoria ja yleiskäyttöistä akkulaturia. Itse toteutettavissa ovat taas muun muassa vahvistin, kotelo ja akku.

Kaiuttimen budjetti pyritään pitämään markkinoilla olevien suurempikokoisten kannettavien kaiuttimien tasolla. Näiden hinnat vaihtelevat noin 300 – 600 euron välillä. Kuvassa 1 on esitetty esimerkkejä menestyneistä malleista. Hinnaltaan kaupallisia toteutuksia vastaavan laitteen rakentamiseen liittyy kuitenkin haasteita. Komponenttien hankinnassa ei ole saavutettavissa samaa määrätua kuin suurella valmistajalla. Lisäksi ei ole mahdollisuutta muun muassa tarkoitukseen räätälöityihin kaiutinelementteihin. Ongelmia osien saatavuuden suhteen aiheuttavat myös merkittävät toimituskulut Suomeen.



**Kuva 1:** Kaupallisesti saatavilla olevia suurikokoisia kannettavia kaiuttimia ja niiden suositushinnat. Vasemmalta alkaen lueteltuna JBL Boombox (499 €) [2], Aiwa Exos-9 (299€) [3] ja DiamondBoxx Model M3 (599 \$, tilattavissa Yhdysvalloista) [4].

## 2.1 Vahvistin ja virtalähde

Bluetooth-moduulilta tai AUX-sisääntulosta saatava äänisignaali ei ole riittävän suuritehoinen tuottamaan ääntä kaiuttimilla. Väliin tarvitaan ulkoisesta virtalähteestä tehonsa ottava vahvistin. Työn tarkoituksena on käyttää luokan D vahvistinta, jonka toimintaperiaatteeseen ja rakentamiseen perehdytään myöhemmin tässä työssä. Vahvistinpiirejä on saatavilla hyvin vaihtelevin ominaisuuksin. Tässä työssä vahvistinpiiriksi valitaan Texas Instrumentsin TPA3116D2 [5]. Valinta perustellaan tarkemmin vahvistimen rakentamista käsittelevässä kappaleessa 4.

Kaiuttimen ollessa kannettava ainut toteutuskelpoinen virtalähde sille on akku. Akun valintaan vaikuttavat vaatimukset suuresta kapasiteetista ja keveydestä sekä myös luonnollisesti turvallisuudesta. Erilaisia akkuteknologioita on useita, joista yleisimpiä ovat lyijyakku, nikkelimetallihydridiakku (NiMH) sekä erilaiset litiumioniakut [6]. Lyijyakut sekä NiMH-akut ovat energiatiheydeltään merkittävästi litiumioniakkuja huonompia ja siten sellaisten käyttö lisäisi liikaa massaa [6]. Vaatimukset huomioiden vaihtoehtoja jää lopulta kaksi: litiumioni- ja litiumpolymeeriakku. Näiden pääasiallinen ero on pakkaustyypissä, ja siten valintakriteereinä hinta ja saatavuus korostuvat [7].

Koska akun muodolla ei ole tämän työn kokoluokan laitteessa suurta merkitystä, käytetään yleistä, edullista ja helposti saatavilla olevaa 18650-muotoista litiumioniakkua. Edullisimmaksi vaihtoehdoksi valikoitui nimelliskapasiteetiltaan 3500 mAh:in suuruinen suojapiiritön Samsungin INR18650-35E -mallinen akku [8]. Tämän akun nimellisjännite on datalehden mukaan 3,60 V [8]. Jännite kuitenkin vaihtelee varaustasosta riippuen 2,65 ja 4,20 V:n välillä [8]. Vahvistinpiiri TPA3116D2 tarvitsee datalehden mukaan 4,5 – 26 voltin käyttöjännitteen [5]. Datalehdeltä huomataan maksimaalisen ulostulotehon olevan verrannollinen käyttöjännitteeseen [5]. Mikäli halutaan saavuttaa vahvistimen maksimiteho, tulee jännitteen siis olla vahvistimen käyttöjännitealueen yläpäästä.

Tarvittavan jännitteen saavuttamiseksi tarvitaan siis akkujen kytkemistä sarjaan. Jos akkuja kytketään sarjaan 6 kappaletta, on maksimijännite niiden ollessa täynnä  $6 \cdot 4,20 \text{ V} = 25,20 \text{ V}$ . Jos akut purettaisiin tyhjäksi alimpaan sallittuun jännitteeseen, olisi kokonaisjännite silloin  $6 \cdot 2,65 \text{ V} = 15,9 \text{ V}$ . Kapasiteettia voidaan lisätä kytkemällä akkuja rinnakkain. Esimerkiksi kolmen akun rinnankytkennässä kapasiteetti ja maksimaalinen purkuvirta 3-kertaistuvat. Akkujen käyttökelpoiseen jännitealueeseen vaikuttaa myös suojapiiri (BMS, Battery Management System) [9, s. 112]. Suojapiirin tarkoituksena on suojata akkua muun muassa yllätaukselta ja ylipurkautumiselta sekä tasapainottaa akun eri ken-



nojen väliset jännite-erot ... [9, s. 112] [10]. Suojapiiriksi valittiin Shenzhen E-Fire Technology Developmentin 25 A:in jatkuvan purkuvirran kestävä suojapiiri sen edullisuuden ja yksinkertaisuuden vuoksi. Tälle piirille minimijännite, johon akut päästetään purkautumaan, on 2,80 V [10]. Jännitteellä  $6 * 2,80 \text{ V} = 16,8 \text{ V}$  vahvistin ei anna enää täyttä tehoa, vaan datalehden mukaan yhden kanavan teho on pudonnut 60 W:sta noin 35 W:iin [5].

Kaavasta

$$dB = 10 * \log_{10} \frac{P_1}{P_2} = 10 * \log_{10} \frac{35}{60} \approx -2,3 \text{ dB} \quad (1)$$

huomataan, että äänenpaineessa tämä on vain noin -2,3 dB:n ero. Lisäksi voidaan olettaa, että tilanne, jossa suurikapasiteettinen akku purettaisiin aivan loppuun, ei ole kovin yleinen. Toinen vaihtoehto olisi käyttää matalampaa akun jännitettä, esimerkiksi 12 V, ja nostaa se jännitettä nostavalla DC-DC-muuntimella 24 V:iin. Tämä kuitenkin vaatisi ylimääräisen komponentin, joka lisäisi painoa ja laskisi hyötysuhdetta.

## 2.2 Audiosignaalin vastaanotto ja jakosuotimet

Rakennettavan laitteen on kyettävä vastaanottamaan audiosignaalia pääasiassa mobiililaitteista. Nykyinen kehityssuunta kuluttajalaitteissa on fyysisten liittimien vähentäminen [11]. Tästä huolimatta Bluetooth-yhteyden rinnalle päätettiin toteuttaa AUX-liitäntä. Käytetyn Bluetooth-moduulin mukana tullessa paneelissa oli valmiiksi paikka naarasliittimelle, joten liittimen lisäämisestä ei aiheutunut juurikaan vaivaa.

Jotta laite kykenee toistamaan halutun taajuusvasteen, tulee siinä olla useampia eri taajuuksia toistavia kaiutinelementtejä [12, s. 618]. Vastaanotetun signaalin taajuuskaista pitää siis jakaa myös useaan osaan. Vaihtoehtoina ovat aktiivinen ja passiivinen jakosuodin (*engl. audio crossover*) [12, s. 625]. Passiiviset jakosuotimet koostuvat kondensaattoreista, keloista ja vastuksista [13, s. 42—43]. Toiminta perustuu reaktiivisten komponenttien, eli kondensaattorien ja kelojen, impedanssin muutokseen taajuuden funktiona [13, s. 42—43]. Tämän tyyppinen suodin asetetaan useimmiten vahvistimen ja kaiuttimen väliin [12, s. 625]. Etuna on pääasiassa yksinkertaisuus.

Aktiivinen jakosuodin sisältää puolestaan ulkoisen tehonlähteen vaativan komponentin, kuten operaatiovahvistimen. Jakotaajuuden säätäminen ja vahvistuksen lisääminen rajataajuudelle ovat myös mahdollisia. Laitteen toteutuksessa ongelmana on molemmissa

jakosuodintyypeissä kuitenkin joustamattomuus. Kaupallisissa laitteissa taajuusvastetta on usein muokattu myös muualla kuin rajataajuuksilla. Esimerkiksi rajoitettu kotelon tilavuus ja siitä johtuvat kompromissit kotelon virityksessä voivat johtaa epätasaisuuksiin taajuusvasteessa. [13, s. 406—407]

Epätasaisuuksia taajuusvasteessa voidaan korjata digitaalisella signaalinkäsittelyllä. Tarkoitukseen käytetty komponentti on DSP (*engl. Digital Signal Processor, digitaalinen signaaliprosessori*) [12, s. 625]. DSP-piiri on mikroprosessori, joka on optimoitu suorittamaan tyypillisiä signaalinkäsittelyyn liittyviä operaatioita näytteistetylle datalle suurella nopeudella [14, s. 104—107]. Valmiita kaupallisia toteutuksia äänisignaalin prosessointiin on useita. Yksi helpoiten saatavilla olevista ja edullisimmista ominaisuuksiinsa verrattuna on MiniDSP 2x4. Valmiin signaaliprosessorin käyttäminen kaiuttimen toteutuksessa säästää merkittävästi aikaa ja mahdollistaa laitteen taajuusvasteen muokkaamisen graafisen käyttöliittymän kautta. MiniDSP yhdistetään tietokoneeseen USB-kaapelilla (*engl. Universal Serial Bus, universaali sarjaliikenneväylä*). Laitteen mukana tuleva ohjelmisto *2x4 Advanced Plugin* mahdollistaa muun muassa kaikkien äänikanavien jakosuotimien yksityiskohtaisen suunnittelun sekä taajuuskorjauksen. [15]

## 2.3 Kaiutinelementit ja kotelo

Kaiutinelementtien valinnassa hyödynnetään aiempaa kokemusta, Eurooppalaisten jälleenmyyjien valikoimia ja internetin tietokantaa *loudspeakerdatabase.com* [16]. Tavoitteena on löytää kaiutinelementit, jotka kykenevät kattamaan taajuusalueen 45 Hz:stä noin 20 kHz:iin. Kannettavuuden vuoksi kotelo ei voi olla kooltaan kovinkaan suuri, joten kokonaistilavuudeksi kaikille elementeille ja tarvittavalle elektronikalle arvioidaan noin 15 - 18 litraa. Tavoitellun taajuuden alarajan ollessa noin 45 Hz:ä todetaan loogisimmaksi vaihtoehdoksi käyttää alataajuuksien toistoon yhtä halkaisijaltaan noin 6,5" basso-kaiutinta. Useamman elementin käyttöä basson toistoon ei koettu näin pienessä tilavuudessa kannattavaksi. Esimerkiksi sivustolta *loudspeakerdatabase.com* voidaan huomata, ettei halkaisijaltaan pienempiä kaiutinelementtejä, jotka kykenevät 45 Hz:n taajuuteen asti, ole juurikaan saatavilla [16].

Datalehdeltä voidaan lukea vahvistinpiirin TPA3116D2 maksimitehoksi  $60 W_{\text{rms}}$  kanavaa kohden 4 ohmin kuormaan [5]. Bassokaiuttimen ominaisuuksien tulee vastata tätä. Sopivaksi vaihtoehdoksi valikoituu Tang Band W6-1139SI-bassoelementti, jonka tarkempi soveltuvuus tarkoitukseen todennetaan myöhemmin simuloimalla. Tämän elementin taa-

juusvasteen yläraja on datalehden mukaan 800 Hz:iä. Valmistaja on ilmoittanut elementin olevan tyypiltään alibassokaiutin (engl. Subwoofer). Yleisesti tämän tyyppiset kaiuttimet soveltuvat ainoastaan matalien äänien toistoon ja tyypillisesti korkeimmat toistettut taajuuudet rajataan noin 200 Hz:iin [17]. Rajoitetun taajuuskaistansa vuoksi valittu alibassokaiutin vaatii rinnalleen ylätaajuuksien toistamiseen tarkoitetun elementin, jotta saavutetaan tavoiteltu 20 kHz:iin yltävä taajuusvaste. [18]

Vahvistimen toista kanavaa käytetään jo matalien taajuuksien toistoon, joten toinen kanava on vapaana ylätaajuuksien toistavalle elementille. Kriteereinä tämän elementin valintaan ovat kyky tuottaa ääntä taajuusalueella 150 Hz – 20 kHz:ä sekä vahvistimen kanavaa vastaava tehonkesto ja impedanssi. Useat kokoäänikaiuttimet vaativat huomattavasti pienemmän kotelon tilavuuden, joten 2:n tai jopa 4:n pienemmän kaiutinelementin käyttäminen on mahdollista. Usealla eri reunoille koteloa sijoitettavalla kaiutinelementillä pystytään myös luomaan vaikutelma stereoäänestä, vaikka tässä tapauksessa molemmat puolet toistavatkin saman vahvistinkanavan signaalia. Tarkoitukseen sopivaksi elementiksi valittiin lopulta 4 kappaletta FaitalPRO 3FE22:n 4 ohmisia versioita [19]. Vahvistimen 4 ohmin impedanssiin päästään kytkemällä elementtejä sarjaan sekä rinnan.

Kaiuttimen kotelon materiaali vaikuttaa kaiuttimen äänenlaatuun. Usein käytettäviä materiaaleja ovat MDF (engl. *Medium-density fibreboard*, *puolikova kuitulevy*), vaneri ja erilaiset muovilaadut. Myös alumiinikoteloita käytetään korkeatasoisemmissa laitteissa. Yleisesti tiheämpi ja paksumpi materiaali on äänenlaadun kannalta parempi vaihtoehto. Tämänkaltaisen tukeva rakenne ei liiku ja resonoi liikkuvan kaiutinelementin mukana [20]. Paksujen puulevyjen tai suuren muovirakenteen työstämiseen ei ole mahdollisuutta tässä projektissa, joten työstettävyyks on tärkeä kriteeri materiaalin valinnassa. Lisäksi materiaalin pitää olla saatavilla helposti ja suhteellisen edullisesti. Työstämiseen ovat käytettävissä muun muassa Tampereen yliopiston tiloissa sijaitsevan Fablab'in laserleikkurit, jotka ovat opiskelijoiden varattavissa [21]. Tehokkaimmalla 120 W'in Epilog Laser Fusion -leikkurilla työstettävän materiaalin maksimipaksuus on kokemuksen perusteella noin 6 mm, jotta leikkausjälki pysyy siistinä. Noin 6 mm:n kotelon paksuus ei ole akustisesti optimaalinen. Yleisesti koteloiden rakentamisessa käytettyjen puumateriaalien paksuus on 10-24 mm:ä [20].

Työstämisen helpottamiseksi materiaaliksi valittiin 6,5 mm:n paksuinen BB/WG -laatuinen koivupintainen vaneri. Koivuvaneri on tiheydensä ja ristikkäin ladottujen viilujensa vuoksi kestävä ja jäykkä materiaali. Kaiutinkäytössä tämä rakenne ehkäisee muun muassa ei-toivottuja resonansseja [20].

### 3. LUOKAN D VAHVISTIN

Audiovahvistimen tarkoituksena on vahvistaa sisään menevän äänisignaalin tehoa ulostulon ääntä tuottaville elementeille, kuten kaiuttimille. Tavoitteena on yleensä energiatehokkuus, matala särö ja kyky tuottaa tasainen vaste ihmisen kuulemalla taajuualueella noin 20 Hz:n ja 20 kHz:n välillä. Poikkeuksena on vahvistin rajoitetun taajuusvasteen kaiuttimelle, kuten bassokaiuttimelle (woofer) tai diskanttikaiuttimelle (tweeter). [22]

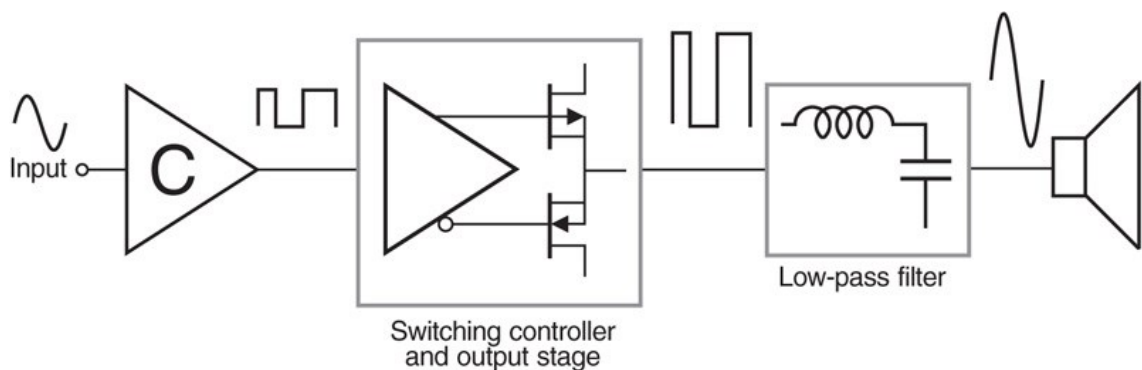
Vahvistimet voidaan jakaa useisiin luokkiin. Nämä luokat määritellään jakson osalla, jonka ulostulon komponentit, käytännössä transistorit, johtavat. Poikkeuksena on luokka D. Siinä jakson osaa ei voida määritellä vastaavasti, sillä transistorit ovat joko täysin johtavassa tilassa tai eivät johda lainkaan. Yleisimmin kuluttajille suunnatussa audiossa ovat käytössä luokat AB ja D. Luokan A vahvistimet ovat nykyisin käytössä lähinnä hyvin kalliissa luksuslaitteissa. Lisäksi on olemassa muun muassa B, C ja G-luokkien vahvistimia, mutta nämä eivät ole yhtä laajasti kaupallisessa käytössä. [23]

Luokan A vahvistimessa transistori toimii jatkuvasti lineaarisella alueellaan ja johtaa koko signaalijakson ajan. Tämä mahdollistaa yksinkertaisen, lineaarisen ja lähes säröttömän vahvistimen. Heikkoutena on kuitenkin hyvin matala hyötysuhde, joka käytännön toteutuksilla voi olla vain muutamia prosentteja musiikkisignaaliin. Parempi hyötysuhde saavutettaisiin luokan B-vahvistimella. Luokan B vahvistin ei kuitenkaan sovellu yksinään laadukkaaseen audiokäyttöön siinä esiintyvän ylimenosärön vuoksi. Yhdistämällä ominaisuuksia näistä kahdesta vahvistinluokasta saavutetaan parempi hyötysuhde ja matala särö, jolloin kyse on AB-luokan vahvistimesta. AB onkin siksi ollut pitkään yleisimmin käytössä oleva vahvistinluokka. [24]

Vaikka AB-luokan vahvistimia on yhä saatavilla kaupallisissa kotiteatterijärjestelmissä, luokan D vahvistin on yleistynyt nopeasti. Transistorien käyttö kytkimen tapaan mahdollistaa teoriassa 100 %:in hyötysuhteen. Lisäksi käyttökelpoisen tehon saaminen matalista yksipuoleisista käyttöjännitteistä on mahdollista. Nämä edut tulevat erityisesti esille akkukäyttöisissä laitteissa, esimerkiksi kuulolaitteissa ja älypuhelimissa. Myös korkeatehoisissa, esimerkiksi yli 1 kW:in PA-laitteistoissa (engl. Public Address system), hyötysuhde on lämmöntuoton minimoinnin kannalta merkittävä kriteeri vahvistimelle. [24]

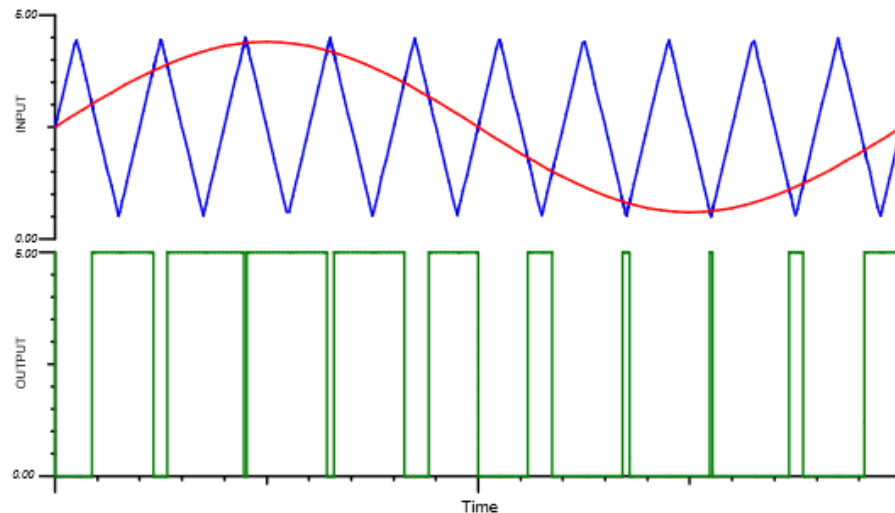
### 3.1 Toimintaperiaate

Luokan D vahvistimen toiminta muistuttaa hakkuriteholähdettä. Hyötysignaali koodataan jollain modulointitekniikalla pulssijonoksi. Kuten hakkuriteholähteessä, transistorit toimivat kytkiminä, jotka vaihtelevat käyttöjännitelinjojen välillä. Ne ovat siis hyötysignaalin tason mukaan johtavassa tai johtamattomassa tilassa. Tällöin pulssin amplitudi kasvaa. Vahvistettu pulssijono palautetaan alkuperäiseen muotoonsa alipäästösuotimella. Rakenteeltaan hakkurivahvistin (*engl. switch-mode amplifier*) koostuu siis kolmesta osasta: modulaattorista (*engl. modulator*), tehovahvistinasteesta (*engl. power stage*) ja lähtösuotimesta (*engl. output filter*). Yksinkertaistettu kuva rakenteesta on esitetty kuvassa 2. [24]



**Kuva 2:** Luokan D vahvistimen peruslohkot. [25]

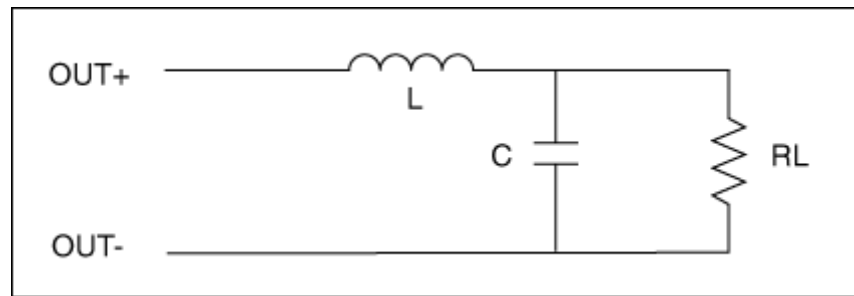
Yleisin tapa toteuttaa modulaattori on käyttää jännitetasonvertaajaa (*engl. Differential comparator*) [26]. Operaatiovahvistimen toiseen sisäänmenoon syötetään vahvistettava audiosignaali, toiseen esimerkiksi saha- tai kolmioaalto. Kun saha- tai kolmioaallon jännite on korkeampi kuin audiosignaalin, jännitetasonvertaajan ulostulo on nollassa [25]. Vastaavasti kun saha- tai kolmioaalto on alempana, jännitetasonvertaajan ulostulo on ylimmässä arvossaan [25]. Ulostulossa näkyy siis kanttiaalto, jonka pulssisuhde riippuu sisäänmenon audiosignaalin arvosta [25]. Esimerkki tästä kolmioaallolla on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3:** Pulssinleveysmodulaation periaate. Jännitetasovertaajan ulostulo (vihreä) kun sisäänmenossa on kolmioaalto (sininen) ja audiosignaalia kuvaava siniaalto (punainen). [26]

Tehonvahvistinasteessa käytetään tyypillisesti MOSFET-transistoreja (engl. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) [27]. Yleisimmin käytetään kahta transistoria. Toinen on n-kanavainen ja toinen p-kanavainen. Transistorien tila vaihtelee vuorotellen saturaation ja johtamattoman tilan välillä. Ideaalisesti transistorit vaihtaisivat tilaansa äärettömän nopeasti eli niiden tilan muutosnopeus (engl. Slew-rate) olisi ääretön. Todellisuudessa kuitenkin tilan vaihtuminen vie aikaa ja syntyy tilanne, jossa molemmat transistorit johtavat samaan aikaan [27]. Tämä aiheuttaa matalaimpedanssisen yhteyden käyttöjännitelinjan ja maan välille [27]. Syntyvä suuri virtapulssi voisi pahimmillaan aiheuttaa esimerkiksi transistorien vioittumisen. Tämän välttämiseksi transistorien tilan muutosta on ajoitettava ulkoisella ohjaimella (engl. MOSFET driver) [27]. Ajoittaminen on tärkeää myös äänenlaadun kannalta, sillä epätarkkuus ajoituksessa lisää vahvistimen epälineaarisuutta [27].

Ulostulossa vahvistetusta kanttiaallosta palataan alkuperäisen muotoiseen hyötysignaaliin alipäästösuotimella. Yksinkertaisimmillaan kelasta ja kondensaattorista muodostuva suodin toimii passiivisena integraattorina [28]. Esimerkki tästä on esitetty kuvassa 4. Integraattorin ulostulo on kanttiaallon keskiarvo [28]. Ilman suodatusta ulostulossa näkyy vahvistetun audiosignaalin lisäksi korkeataajuuksinen kytkinkomponentista aiheutuva signaali. Esimerkiksi käytetyn vahvistinpiirin TPA3116D2 tapauksessa kytkimen taajuus voidaan asettaa 400, 500, 600, 1000 tai 1200 kHz:in taajuuteen [5]. Suotimen tarkoituksena on myös päästää läpi 20 Hz – 20 kHz taajuinen audiosignaali mahdollisimman muuttumattomana.



**Kuva 4:** Yksinkertainen ulostulon suotimen toteutus. Negatiivista terminaaliala "OUT-" ei suodateta tässä kytkennässä ollenkaan ennen kaiutinta (RL). Tämä suodin ei vähennä siten riittävästi sähkömagneettisia häiriöitä (engl. EMI, Electromagnetic Interference) [28].

Erittäin hintakriittisissä tai pienikokoisissa sovelluskohteissa ulostulossa ei välttämättä käytetä suodinta. Kaiuttimen impedanssi kasvaa kuultavaa ääntä korkeammilla taajuuksilla puhekelan impedanssin ollessa taajuusriippuvainen. Joissain käyttökohteissa tämä lisääntynyt impedanssi saattaa riittää vaimentamaan korkeataajuisen signaalin audiosignaalista. [28]

### 3.2 Haasteita

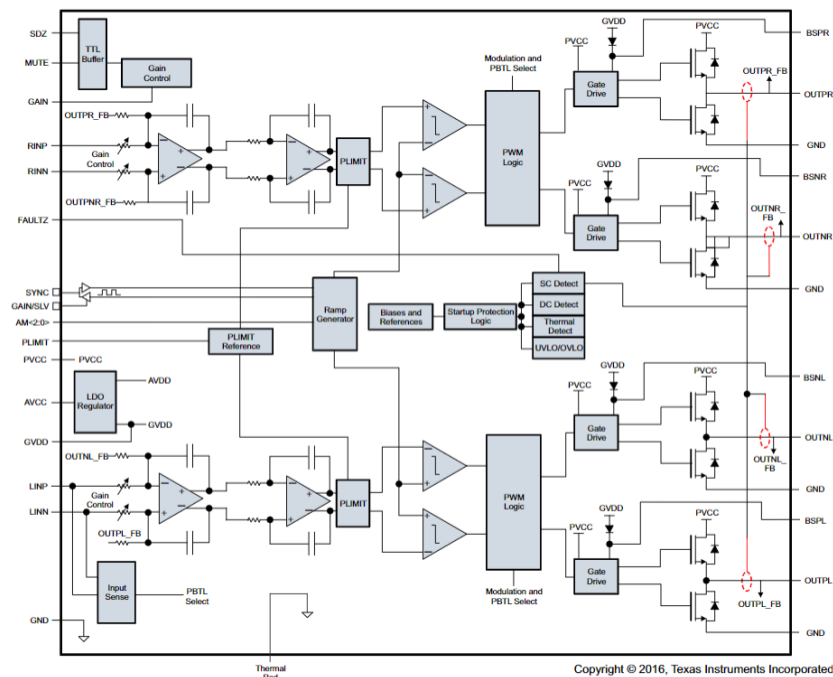
Luokan D-vahvistimen merkittävimmät ongelmat liittyvät transistorien tilan vaihteluun, sähkömagneettisiin häiriöihin ja tehonlähteen vaatimuksiin. Transistorien tilat tulisi ajoittaa siten, että ne eivät johda samaan aikaan. Käytännössä kuitenkin rajallisen muutosnopeuden vuoksi transistorit ovat hetkellisesti lineaarisella alueellaan ja alkuperäinen pulssi ei vahvistu täysin samanlaisena. Tämä näkyy vahvistimen ulostulosta mitattuna särönä. [27]

Hakkurivahvistimen nopeasti tilaansa vaihtavat transistorit aiheuttavat erityisiä vaatimuksia sähkömagneettisten häiriöiden minimoimiseksi [5]. Piirin osat, kuten johtimet, saattavat toimia antennina ja siten säteillä korkeataajuisia signaaleja. Tätä voidaan ehkäistä esimerkiksi komponenttien sijoittelulla ja yhtenäisellä maatasolla [5]. Usein vahvistinpiirien valmistajat antavat suosituksia komponenttiarvoille ja sijoittelulle, joita on mahdollista käyttää pohjana omissa toteutuksissa [5]. Tehonlähteen merkittävämpänä lisävaatimuksena verrattuna esimerkiksi luokan AB-vahvistimeen on energian vastaanottaminen reaktiiviselta kuormalta [29]. Lineaarinen vahvistin absorboi tämän energian, kun taas luokan D vahvistin palauttaa sen tehonlähteelle [29]. Yksi keino ongelman ratkaisuun on lisätä kapasitanssia tehonlähteen ulostuloon, kuten tässäkin työssä tehtiin.

## 4. VAHVISTIMEN SUUNNITTELU

Vahvistinpiiriksi valittiin luokan D TPA3116D2 Texas Instrumentsilta. Piiri on edullinen, saatavilla helposti ja suosittu äänentoistolaitteita rakentavien harrastelijoiden keskuudessa. Piiri toimii laajalla käyttöjännitealueella 4,5 – 26 V:a. Se soveltuu siis hyvin akkukäyttöiseen laitteeseen, jossa käyttöjännite vaihtelee hieman akun varaustason mukaan. TPA3116D2 on 2-kanavainen, joten sillä voidaan vahvistaa sekä matalat että korkeat taajuudet. Maksimiteho 60  $W_{rms}$  kanavaa kohden riittää myös useille laitteen kokoluokassa käytettäville kaiutinelementeille. [5]

Kuvassa 5 on esitetty vahvistinpiirin toiminnalliset lohkot. Piiri sisältää valmiiksi modulaattorin ja tehonvahvistinasteen, joten toimiva vahvistin on mahdollista toteuttaa suhteellisen pienellä määrällä ulkoisia komponentteja. Lisäksi tarjolla on suuri määrä erilaisia säätömahdollisuuksia sovelluskohteen mukaan. Piirin kanavat on esimerkiksi mahdollista yhdistää yksikanavaiseksi tehokkaammaksi vahvistimeksi matalampaan 2 ohmin impedanssiin. Lisäksi toteutettuna on useita laitetta suojaavia ominaisuuksia. Piiri sammuttaa vahvistimen, mikäli havaitaan väärä käyttöjännite, ylikuumeneminen tai kaiutinterminaalien oikosulku. Lisäksi useista virheistä tulee tieto FAULTZ-pinniin, mikä olisi esimerkiksi mikrokontrolleriohjatussa kaiutintoteutuksessa hyödyllinen tieto. [5]



Kuva 5: Vahvistinpiirin TPA3116D2 toiminnalliset lohkot [5].



## 4.1 KytKentä

KytKentää lähdettiin suunnittelemaan KiCAD-ohjelmalla. Datalehden esimerkikykentästä saatiin suuntaa antava kuva muun muassa komponenttiarvoista. Lisäksi komponenttien sijoittelusta oli annettu suosituksia. Piiriä päätettiin käyttää 400 kHz:n hakkurin taajuudella esimerkikykentän mukaisesti. Yleisin syy taajuuden vaihtamiseen on AM-radion (*engl. Amplitude Modulation*) aiheuttama häiriö [5]. Useimpien AM-radioasemien lähetystaajuuudet tai niiden 2. harmoninen monikerta ovat luokan D vahvistimien hakkurin taajuuden lähellä. Suuritehoisia käytössä olevia AM-radioasemia ei kuitenkaan ole Suomessa, joten toteutuksessa päätettiin käyttää esimerkin mukaisesti taajuutta 400 kHz [30].

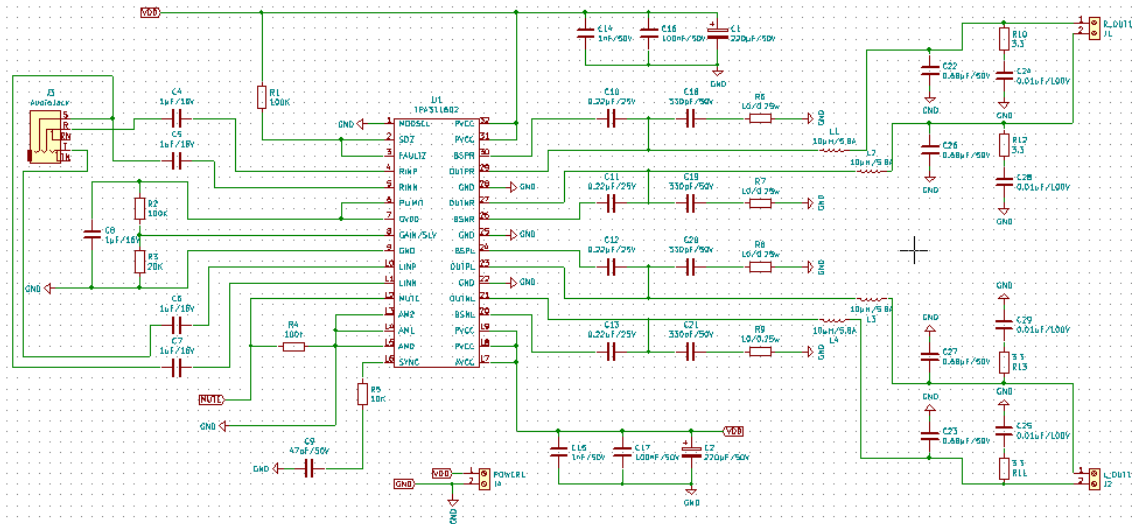
Myös vahvistus on säädettävissä yksinkertaisella vastuskombinaatiolla [5]. Bluetooth-moduulilta lähtevän signaalin maksimiampplitudiksi mitataan oskilloskoopilla noin 400 mV<sub>rms</sub>. Jotta saavutetaan 60 W:in ulostuloteho, jännitteen 4 ohmin kuorman yli tulisi olla

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{60W * 4\Omega} \approx 15,5V. \quad (2)$$

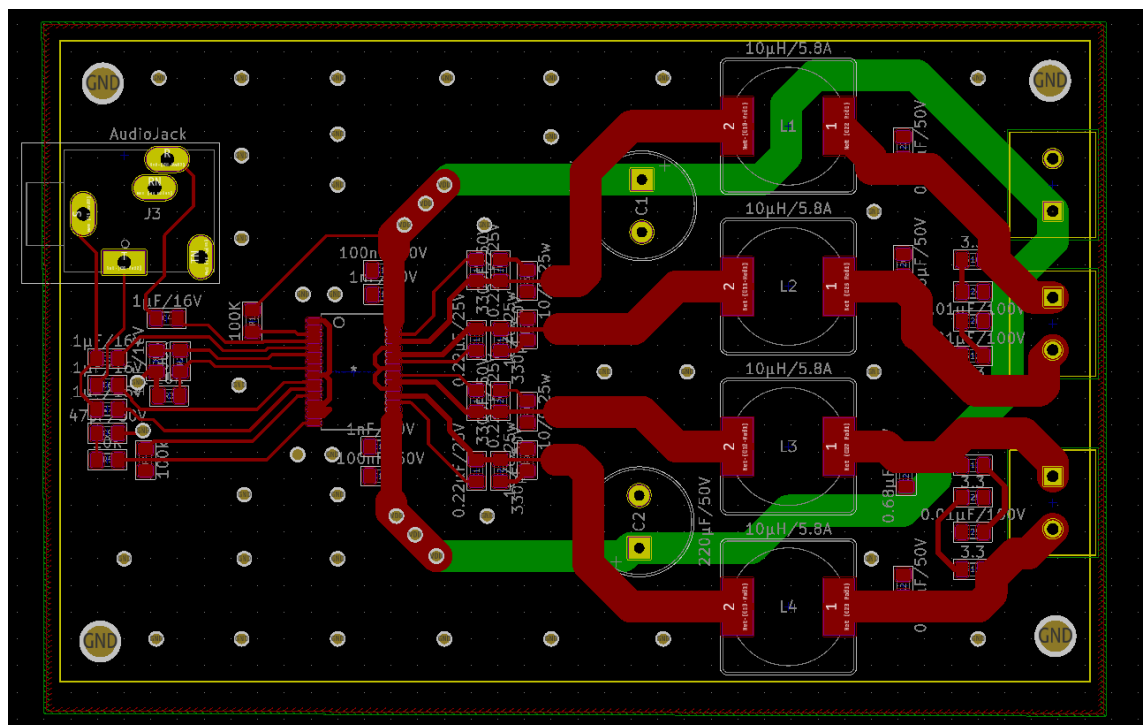
Jännitevahvistuksen tulisi siten olla

$$dB = 20 * \log_{10} \frac{V_{out}}{V_{in}} = 20 * \log_{10} \frac{15,5V}{0,4V} \approx 31,8 dB. \quad (3)$$

Vahvistinpiirissä on 4 eri vaihtoehtoa vahvistukselle [5]. Näistä 32 dB on lähimpänä edellä laskettua. Datalehden mukaan tämä saavutetaan asettamalla vahvistuksen valinnan vastuskombinaatioksi 39 kΩ ja 100 kΩ [5]. Koska kaiutinelementit kestävät vahvistimen maksimitehon, vahvistimessa olevia tehorajoitusominaisuuksia ei käytetä tässä työssä. Suunnitellut piirikaavio sekä piirilevy esitetään kuvissa 6 ja 7.



**Kuva 6:** Suunnitellun vahvistimen piirikaavio KiCAD-ohjelmassa.



**Kuva 7:** Valmis piirilevyn layout KiCAD-ohjelmassa ilman molemmilla puolilla olevia kuparitäyttöjä. Punaiset kuparivedot ovat piirilevyn päällipuoella ja vihreät takana.

## 4.2 Piirilevy

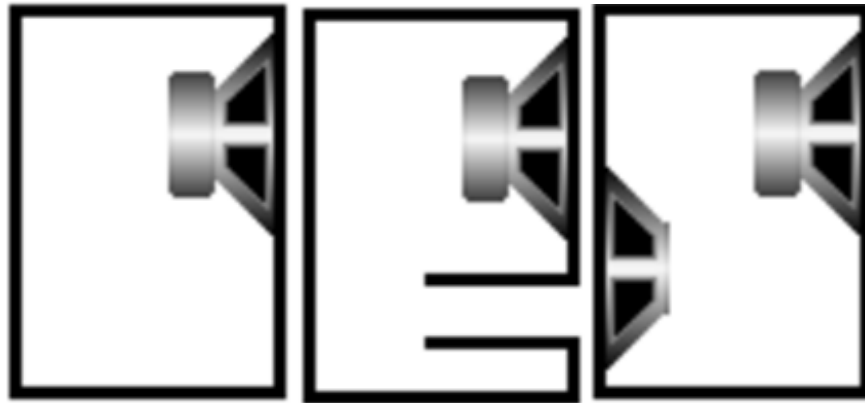
Vaihtoehtoina piirilevyn toteuttamiseen ovat itse valmistaminen ja valmiin juotosvalmiin piirilevyn tilaaminen. Piirilevyn tilaaminen ammattivalmistajalta varmistaisi johdinten ja läpivientien laadun sekä mahdollistaisi esteettisesti paremman lopputuloksen. Toisaalta tilatussa piirilevyssä muutosten tekeminen suunnitteluvirheen tapauksessa olisi aikaa

vievää ja kallista. Yhden toimivaksi todetun mallin jälkeen tilaaminen olisi kuitenkin ehdottomasti parempi vaihtoehto.

Koska pintaliitoskomponenteilla on vaikeaa tehdä koekytkentöjä ja siten todentaa kytkennän toimivuus ennen tilaamista, piirilevy päätetään valmistaa itse. Itse valmistettaessa ongelmia tuottavat erityisesti läpiviennit. Datalehdellä suositellaan käytettäväksi paljon läpivientejä yhdistämään piirilevyn puolet [5]. Erityisesti vahvistinpiirin alle on datalehden esimerkkikytkennässä suositeltu jopa kymmeniä läpivientejä pienelle alueelle lämmönsiirron tehostamiseksi [5]. Käsien juottamalla tämä ei kuitenkaan ole mahdollista. Ongelma voidaan kuitenkin ratkaista käyttämällä suositeltua suurempaa lämpörautaa vahvistinpiirin päällä.

## 5. KAIUTINKOTELO

Kaiuttimen akustinen suunnittelu perustuu usein tietokoneavusteisen mallinnuksen lisäksi kokeiluun. Kaiutinelementit ovat laitteessa aktiivisesti ääntä tuottava osa. Useimmat kaiutinelementit vaativat tarkkaan mitoitettun kotelon. Kotelotyyppejä on esitetty kuvassa 8.



**Kuva 8:** Erityyppisiä kaiutinkoteloita VituixCAD-ohjelman kotelonsuunnitteluvalikosta [31].  
Järjestetyksessä vasemmalta alkaen tyypit ovat suljettu kotelo, refleksikotelo putkella ja refleksikotelo passiivisäteilijällä.

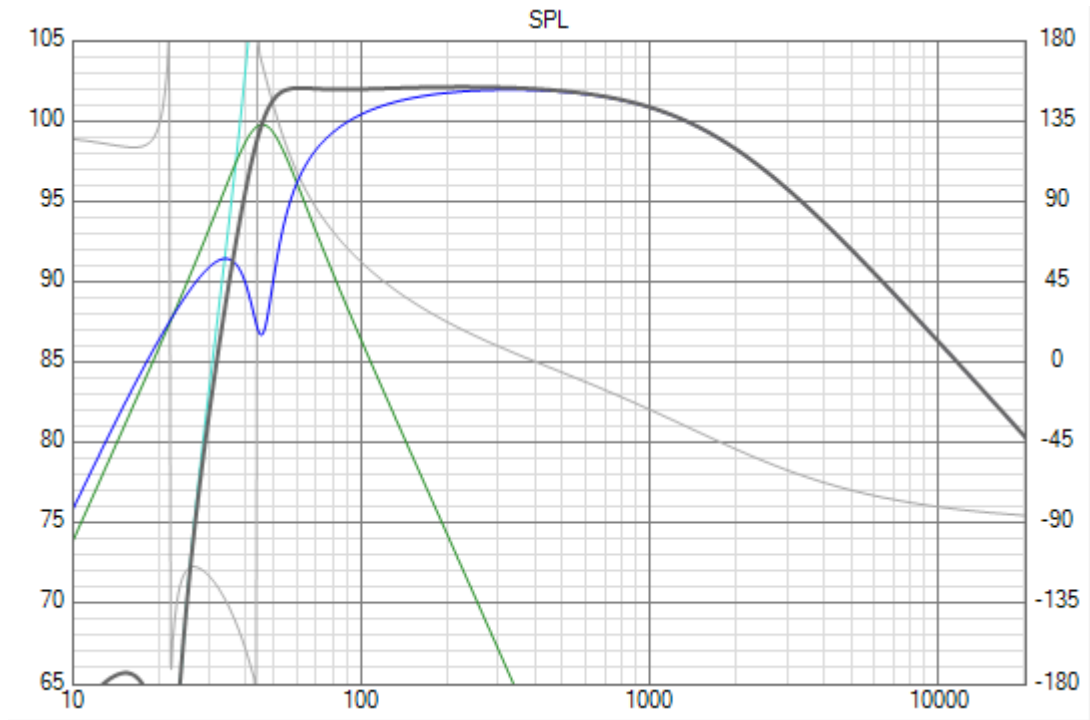
Yksinkertaisin kotelotyyppi on suljettu kotelo (eng. sealed enclosure). Kotelon sisällä oleva ilmamassa on eristetty ulkopuolisesta ilmatilasta. Suljetun kotelon merkittävimpinä etuina kannettavassa kaiuttimessa ovat pieni koko ja rakentamisen yksinkertaisuus. Haittana suljetussa kotelossa on muihin kotelotyyppeihin verrattuna loiva siirtymä päästökaistalta estokaistalle. [32]

Toinen yleinen kotelotyyppi on refleksikotelo (engl. bass reflex enclosure) [32]. Kotelossa on yksi tai useampi aukko, joka toimii Helmholtzin resonaattorina, kun kaiutinelementti liikuttaa kotelon ilmamassaa [32]. Ilmamassa värähtelee taajuudella, joka riippuu aukon ja kotelon koosta [33]. Resonaattorin värähtelytaajuus asetetaan taajuuskaistan alapäähän, jossa kaiutinelementin oma vaste on jo alkanut heikentyä. Tällöin lisätty resonaattori täydentää kaiuttimen taajuusvastetta. Suljettuun koteloon verrattuna siirtymäkaista on lyhempi ja siten kaiuttimen käyttökelpoinen tasainen taajuuskaista on pidempi. Erityisesti kotelon tilavuuden ollessa rajallinen, tämä mahdollistaa matalamman basson toistamisen. Resonaattorina käytetään kaiutinrakennuksessa usein molemmista päistään pyöristettyjä putkia, joiden pituus ja poikkipinta-ala mitoitetaan halutun värähtelytaajuuden mukaan [32].

Resonaattori voi olla myös ulkoisesti kaiutinelementtiä muistuttava passiivisäteilijä (*engl. passive radiator*). Erona on, ettei passiivisäteilijässä ole magneettia, vaan se värähtelee kaiutinelementin liikuttaman ilmamassan vaikutuksesta. Yleensä etuna sen käytössä on, ettei siitä aiheudu ilmamassan nopeasta liikkeestä aiheutuvaa ääntä, kuten putkessa. [32] Tässä työssä sen sijaan passiivisäteilijän käyttöön päädyttiin, koska se mahdollistaa ilmatiiviin kotelon. Erityisesti kannettavassa laitteessa ilmatiiviys suojaa elektroniikkaa esimerkiksi ulkokäytössä esiintyvältä kosteudelta. Passiivisäteilijöiksi valittiin bassoelementille Dayton Audio DSA215-PR ja jokaiselle diskanttielementeille Dayton Audio DSA115-PR [34] [35]. Yleinen suositus on, että passiivisäteilijä on pinta-alaltaan ja syrjäyttämältään ilmamassalta jonkin verran suurempi kuin sitä vastaava aktiivinen elementti [34] [35]. Valinta perustellaan seuraavassa kappaleessa 5.1 simuloimalla.

## 5.1 Akustinen suunnittelu

Kotelo mallinnetaan ilmaiseksi saatavilla olevalla VituixCAD -ohjelmalla [31]. Ohjelman kotelonsuunnittelutoiminnolla voidaan simuloida halutulle kaiutinelementille erityyppisiä ja kokoisia koteluita. Ohjelma laskee niille taajuusvasteen sekä piirtää kuvaajan. Bassokaiuttimen kotelon suunnittelussa päädyttiin 11 litran refleksikoteloon, jonka resonointitaajuus on 45,2 Hz:ä. Ohjelman mukaan päästökaista loppuu 44,3 Hz:n taajuudessa, mikä vastaa asetettua tavoitetta. Kuvassa 9 esitetystä taajuuskäyrästä on myös selkeästi huomattavissa refleksikotelon valinnan perustelu. Vastaavan kokoisessa suljetussa kotelossa päästökaista olisi loppunut jo 75,5 Hz:n kohdalla.

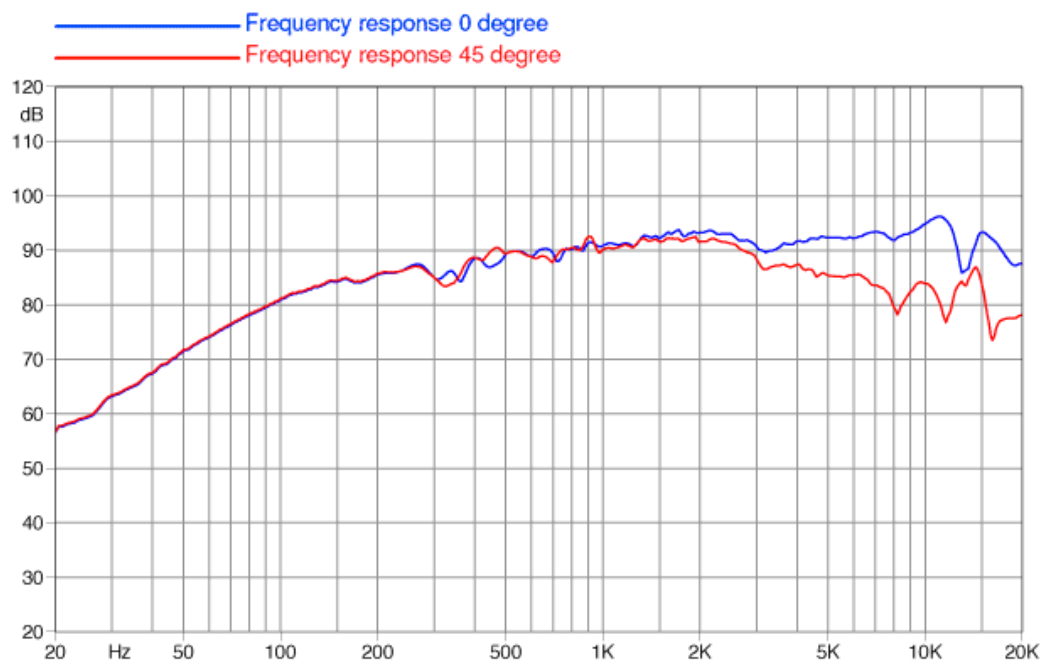


**Kuva 9:** Bassokaiuttimen simuloitu taajuusvaste suunnitellussa kotelossa  $60 W_{rms}$  teholla. Sininen käyrä kuvaa kaiutinelementin tuottamaa äänenpainetta desibeleissä (asteikko vasemmalla). Vihreä käyrä on passiivisäteilijän tuottama äänenpaine. Tummanharmaa käyrä kuvaa näiden kahden summaa eli kokonaisvastetta. Muut käyrät kuvaavat mm. vaihetta ja ohjelmistossa ei voi poistaa niitä näkyvistä.

Diskanttikaiuttimille suunniteltiin 1,6 litran suuruinen refleksikotelo kahta elementtiä kohden. Nämä kotelot asetetaan laitteen molempiin reunoihin. Resonointitaajuudeksi saatiin 110,1 Hz ja päästökaistan rajataajuudeksi 167,1 Hz:ä. Kuvassa 10 esitetty ohjelman piirtämä kuvaaja ei ole tarkka korkeilla taajuuksilla. Korkeilla taajuuksilla arvioitu vaste saadaan valmistajan datalehdeltä ja se on esitetty kuvassa 11. Myös kotelon muodolla on vaikutusta vasteeseen, mutta tämän työn puitteissa tyydytään karkeampaan kuvaan.



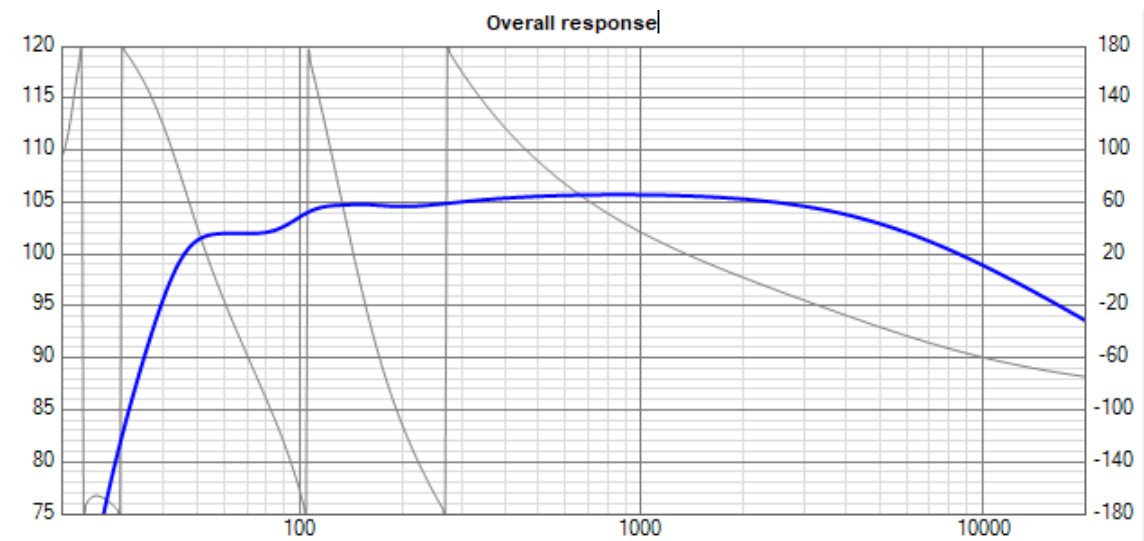
**Kuva 10:** Diskanttikiuttimien vasteet esitettynä vastaavasti kuin bassokiuttimelle.



**Kuva 11:** Valmistajan ilmoittama diskanttikiuttimen vaste, joka saadaan 1 watin teholla metrin päästä mitattuna. Sinisellä käyrällä kuvataan äänenpainetta suoraan kaiuttimen edessä, punaisella vinossa 45 asteen kulmassa. [19]

Ohjelmassa on mahdollista myös suunnitella jakosuotimia ja kokeilla niiden vaikutusta eri kaiuttimelementtien vasteisiin. Ohjelmistolla kokeilemalla suotimiksi valittiin hyvin jyrkät 8:nneen asteen Linkwitz-Riley-suotimet. Alipäästösuotimen taajuus bassolle asetettiin 180

Hz:n taajuuteen ja ylipäästö diskantille 100 Hz:n taajuuteen. Tulokseksi saatiin kuvan 12 mukainen kuvaaja. Tyypillisesti taajuuskaista jaetaan kahteen osaan samasta jakotaajuudesta. Kahden refleksikotelon tapauksessa kuitenkin signaalien vaiheen muutokset monimutkaistavat suunnittelua. Siten tässä työssä päädyttiin kokeilemaan erilaisia vasteita simulaatiossa ja lopulliset jakotaajuudet päätetään lisäksi kuuntelemalla. Simuloitu taajuusvaste antaakin vain teoreettisen kuvan valmiin kaiuttimen ominaisuuksista. Käytännössä vasteeseen vaikuttaa muun muassa valmiin kotelon toteutuneet mitat, elementtien asettelu sekä elementtien yksilökohtaiset erot ominaisuuksissa valmistajan ilmoittamiin. Siksi koekuuntelu ja sen pohjalta tehdyt parannukset ovat tärkeitä vaiheita hyvän lopputuloksen saavuttamisessa.



**Kuva 12:** Kaiuttimen simuloitu kokonaisvaste täydellä teholla, kun yksittäisten elementtien vasteet summataan ja asetetaan jakosuotimet. Bassokaistan huomataan olevan noin 2-3 dB diskanttia alempana. Tätä eroa voidaan kuitenkin säätää molemmissa kanavissa olevilla potentiometreillä, jolloin tarvittaessa voidaan saavuttaa täysin tasainenkin taajuusvaste.

## 5.2 Mallintaminen

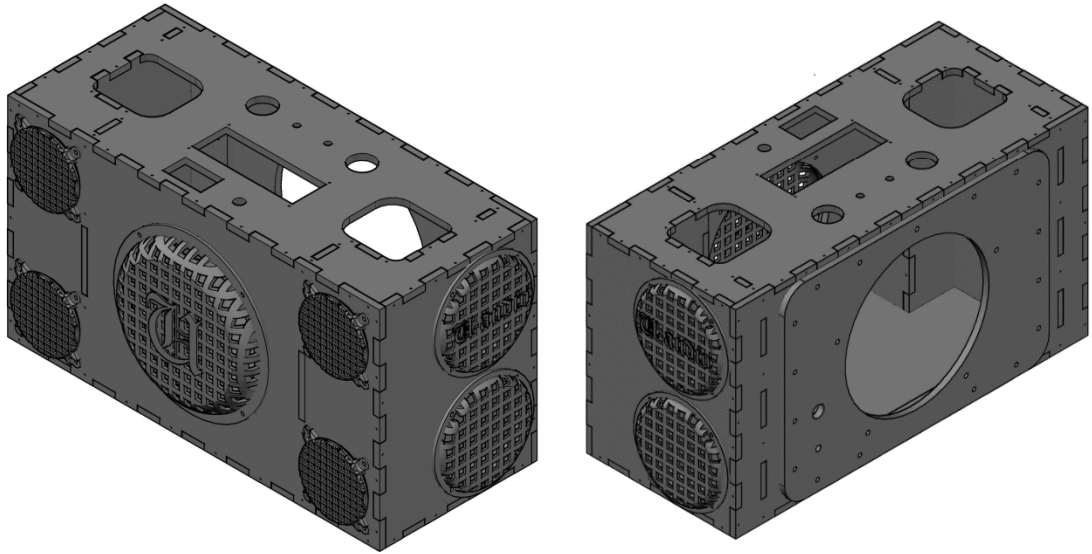
Kaiuttimen kotelo mallinnettiin AutoCAD-ohjelmalla. Kotelon kokoamisen helpottamiseksi osista tehtiin sahalahtaisia paloja, jotka kiinnitetään toisiinsa ruuveilla sekä liimaamalla. Lisäksi limittäinen rakenne on jäykkä ja siten se ehkäisee muun muassa kaiuttimelementin liikkeen ja ilmamassan aiheuttamaa värinää. Tämän voidaan nähdä



myös lisäävän käyttömukavuutta kannettaessa. Sisältä kotelo jakautuu 3:en ilmatiiviseen osaan. Keskimmaisessa osassa on bassokaiutin, sitä vastaava passiivisäteilijä sekä kaikki elektroniikka. Tähän osaan pääsee käsiksi pultein kiinnitetystä avattavasta takakannesta. Kotelon molempiin reunoihin sijoitetuissa osissa ovat diskanttikaiuttimet sekä niiden passiivisäteilijät.

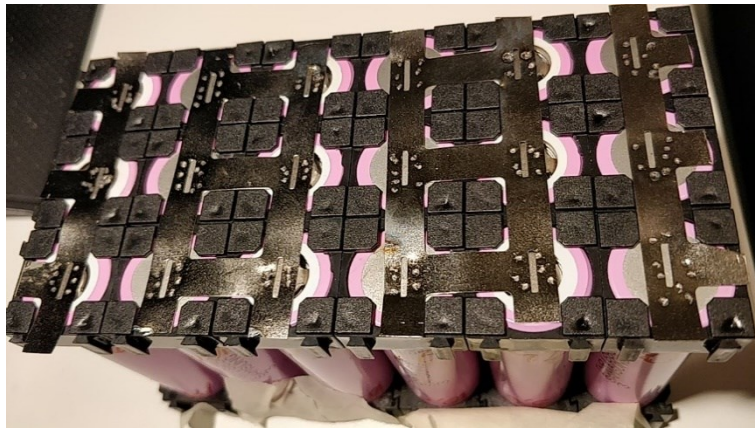
Kaiutinelementtien ja passiivisäteilijöiden suojaksi suunniteltiin suojaritilät. Ritilät 3D-tulostettiin käyttäen Prusa i3 MK3s -tulostinta. Materiaalina käytettiin paksuudeltaan 1,75 mm:in mustaa PLA-filamenttia (*engl. Polylactic acid*). Koska erityisesti bassokaiuttimen ritilä oli suurehko ja tulostusaika siten pitkä, kerrosvahvuudeksi valittiin 0,2 mm. Tällä saavutettiin vahva rakenne ja pinta, joka sopii yhteen mustan karheapintaisen kaiutinmaalin kanssa.

Kanteen tehtiin reiät kantokahvoille, joihin voidaan kiinnittää myös kantohihna. Lisäksi kannessa ovat reiät Bluetooth-moduulin paneelille, jännitenäytölle, virtakytkimelle, USB- sekä AUX-porteille ja äänenvoimakkuuden potentiometreille. Kotelo suojaritilöineen on esitetty kuvassa 13. Takakannessa olevalle passiivisäteilijälle hankittiin erikseen metallinen suojaritilä, joka ei näy 3D-mallin puuttumisen vuoksi kuvassa. Takakansi on laitetta kannettaessa kantajaa vasten, mikä asettaa ritilälle erityisiä kestävyys- ja sileysvaatimuksia. Vaatimuksia on vaikea täyttää käytössä olevalla 3D-tulostuslaitteistolla. Lisäksi halkaisijaltaan noin 22 cm:n sileäpintaisen suojaritilän tulostaminen olisi kestänyt useita kymmeniä tunteja.



**Kuva 13:** AutoCAD -ohjelmistolla mallinnettu havainnekuva kotelosta ilman komponentteja etu- ja takaviistosta. Kotelon mitat ovat 42cm x 23cm x 17cm (leveys-korkeus-syvyys). Eturitilään tehtiin logoksi tyylitelty U-kirjain tekijän nimen mukaan.

Akku koottiin käyttämällä toisiinsa kiinnittyviä holkkeja, jotka jättivät kennojen väliin pienen ilmatilan. Akut liitettiin toisiinsa pistehitsaamalla. Hitsattu akku on esitetty kuvassa 14. Akkujen juottaminen yhteen on myös mahdollista, mutta riskinä on vaurioittaa kennoja kuumentamalla niitä liikaa. Kun suojapiiri oli kytketty ja tarvittavat liitännät tehty, akku koteloitiin laserilla leikattuun 4 mm paksuiseen vanerikoteloon.



**Kuva 14:** Suojaamaton akku juuri nikkeli-liuskojen pistehitsauksen jälkeen. Akkua ei pidetty koteloimattomana pitkään, sillä kuvassa näkyvät metalliliuskat ovat jännitteellisiä.

*Tällöin akun sovittaminen koteloon tai sen kuljetus olisi ollut haastavaa.*

## 6. TESTAUS JA AKUSTISET MITTAUKSET

Alkuun asetettujen vaatimusten toteutuminen todennetaan mittaamalla sekä korvakuvalla arvioimalla. Mittauksia varten ei ollut saatavilla edistynyttä laitteistoa sekä tilaa. Mittaustapa on siksi suhteellisen yksinkertainen ja tulokset lähinnä suuntaa-antavia.

### 6.1 Mittausjärjestelyt

Mittausvälineenä käytetään Dayton Audio EMM-6 -mittausmikrofonia, joka on kytketty tietokoneen ulkoiseen äänikorttiin. Tietokoneelle asennetulla ohjelmistolla Room EQ Wizard toistetaan 20 Hz – 22 kHz testisignaali ja piirretään mikrofonilla mitattu taajuusvaste. Mittauksessa on kompensoitu äänikortin sekä mikrofonin taajuusvasteen epätasaisuus.

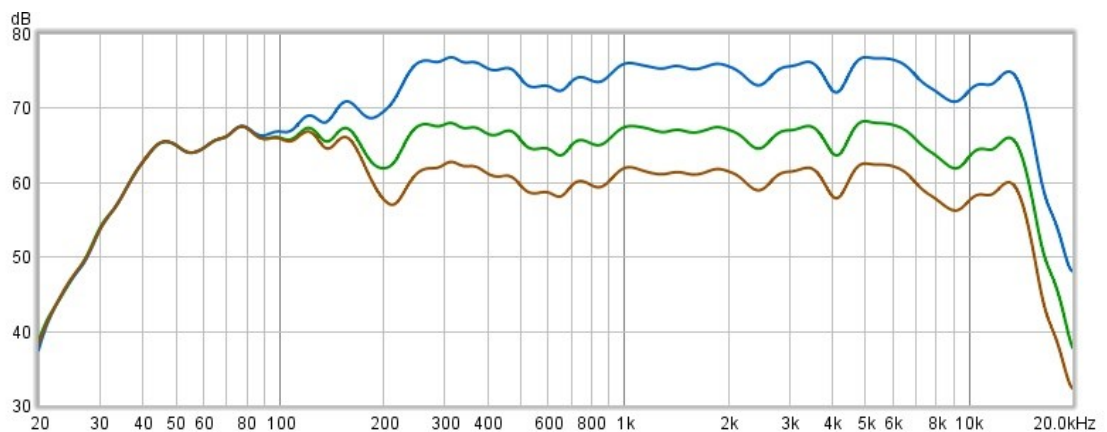
Mittaus suoritetaan suuressa tilassa asettamalla kaiutin ja mikrofoni noin 1,5 metrin korkeisten alustojen päälle. Etäisyys mikrofoniin oli tasan metrin. Tilan vaikutus mittaukseen pyrittiin minimoimaan asettamalla muun muassa patjoja ja muita kaikua vähentäviä esineitä mitattavan kohteen ympärille. Tällä menettelyllä saadaan vain suuntaa antava kuva todellisesta taajuusvasteesta. Tarkempaa mittausta varten tulisi olla täysin kaiuton tila. [12, s. 638—641]

### 6.2 Tulokset

Mittauksen tuottamassa tulokskuvaajassa oli paljon vaihteluja suuresta mittapisteiden lukumäärästä johtuen. Jotta kuvaaja saatiin helpommin tulkittavaan muotoon, käytettiin mittausohjelman tasoitusominaisuutta ”1/6 octave smoothing”. Tulos nähdään kuvasta 15. Sinisen käyrän voidaan havaita vastaavan suhteellisen hyvin kuvassa 12 esitettyä suunniteltua taajuusvastetta. Basso- ja diskanttikanavan potentiometrejä säätämällä voidaan muuttaa näiden taajuusalueiden äänenvoimakkuutta. Kuvassa 15 on säädetty esimerkkinä korkeita taajuuksia. Vihreä käyrä havainnollistaa tilannetta, jossa korkeiden taajuuksien halutaan olevan tasoissa basson kanssa. Ruskean käyrän havainnollistaa asetusta voitaisiin taas käyttää tapauksessa, jossa bassoa halutaan korostaa esimerkiksi ulkotiloissa.

Mitatusta taajuusvasteesta voidaan myös havaita kotelon virityksen onnistuminen. Bassossa huomataan ensimmäinen piikki noin 45 Hz taajuudella, kuten suunniteltiinkin.

Päästökaista yltää silmämääräisesti kuvaajasta arvioiden noin 40 Hz:n taajuudesta 15 kHz:n taajuuteen. Suunnitellussa 45 Hz:n tavoitteessa siis onnistuttiin. Ylätaajuuksilla vaste ei kuitenkaan yltänyt tavoiteltuun 20 kHz:iin asti. Syynä tähän voi olla esimerkiksi poikkeama valmistajan ilmoittamasta taajuusvasteesta. Asiaa voitaisiin korjata korostamalla yli 15 kHz:n taajuuksia taajuuskorjaimella. Tähän ei kuitenkaan ryhdytty, sillä tyyppillisesti musiikin kuuntelussa nämä taajuudet eivät ole erityisen merkittäviä kokonaiskuvan kannalta.



**Kuva 15:** Mitattu taajuusvaste tasoitettuna. Eri väreillä on kuvattu diskantin säätömahdollisuutta potentiometrien avulla.

Musiikkia kuunnellessa kaiutin kuulostaa suhteellisen tasaiselta. Verrattuna useisiin kaupallisiin toteutuksiin basso todellakin ulottuu alemmaksi, mikä saa kaiuttimen kuulostamaan todellista kokoaan isommalta. Toisaalta myös laadukkaaseen ja kalliimpaan kotiteatteriin verratessa kaiutin kuulostaa melko ontolta. Eri suunnista kuunneltaessa myös korkeat taajuudet kuulostavat melko vaimeilta. Matalilla ja keskisuurilla äänenvoimakkuuksilla laite toimii suhteellisen hyvin. Kovempaa kuunneltaessa voidaan havaita kuitenkin kotelon vuotavan. Syynä tähän on Bluetooth-moduulin paneeli liitännöineen, joka ei liimauksesta huolimatta tullut täysin tiiviiksi.

## 7. YHTEENVETO

Kokonaisuudessaan laitteen toteuttaminen onnistui saatavilla oleviin resursseihin nähden hyvin. Työn aikana tuli vastaan useita oivalluksia, joilla laitteesta olisi saanut paremman. Useat niistä pystyttiin toteuttamaan, kuten passiivisäteilijöiden käyttö refleksiputkien sijaan. Useita seikkoja kuitenkin jäi pois valmiista työstä, jotka voivat olla hyödyllisiä tulevia projekteja ajatellen.

Toteutukseen löytyi myöhemmin hieman paremmin sopiva bassokaiutin, joka olisi tuottanut vastaavan taajuusvasteen noin 2 litraa pienemmässä kotelossa. Haittana olisi ollut ainoastaan tämän elementin magneetin suurempi fyysinen koko ja massa. Tämän elementin tehokesto on myös suurempi, joten noin 100 W<sub>rms</sub> tehoisen vahvistimen käyttö olisi ollut mahdollista. [36]

Signaaliprosessorin valinta perustui MiniDSP-signaaliprosessorin helppokäyttöisyyteen ja aikaisempiin kokemuksiin laitteen käytöstä. Kaiutintoteutuksen kaupallistamista ajatellen hinnaltaan parempiakin vaihtoehtoja olisi ollut. Useat näistä eivät kuitenkaan sisällä graafista käyttöliittymää ja ohjelmointi on siten huomattavasti työläämpää. Äänenlaatua olisi voinut myös parantaa signaalin pitäminen digitaalisena signaaliprosessorille asti. Tällöin olisi kuitenkin täytynyt käyttää erilaista ja mahdollisesti kalliimpaa Bluetooth-vastaanotinta, joka tukee I<sup>2</sup>S-väylää (engl. Inter-IC Sound).

Paksuudeltaan 6,5 mm vanerin leikkaus onnistui, mutta leikattavat pinnat hiiltivätkin voimakkaasti. Kaiutin päätettiin päällystää siksi mustalla kaiutinmaalilla. Hiiltyminen johtui käytetyn vanerilaadun kerrosten välisestä liimatyypistä. Käytetty vaneri on tarkoitettu ulkokäyttöön ja siinä viilut ovat yhdistetty fenolihartsiliimalla. Paremmin laserilla leikattavaksi olisi soveltunut sisäkäyttöön tarkoitettu vaneri, jossa kerrosten välissä on ureaformaldehydiliimaa. [37] Tätä vanerityyppiä ei kuitenkaan ollut saatavilla helposti. Puun työstämiseen parempi valmistustapa olisikin ollut CNC-jyrsin (engl. *Computer Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus*). Fablab Tampereen jyrsimen käyttöön vaadittavaa koulutusta ei kuitenkaan ollut saatavilla tämän työn tekohetkellä.



**Kuva 16:** Koottu laite. Kotelon puupintaa ei ole kuvassa vielä hiottu tai viimeistelty, joten siitä on nähtävissä vanerin hiiltyminen ja liitostekniikka.

Valmiissa kotelossa, joka on esitetty kuvassa 16, havaittiin myös useita ilmapuotoja. Eri-tyisesti Bluetooth-moduulin paneelin painikkeet sekä AUX-liitin päästivät ilmaa läpi. Ilman virtaus on kuultavissa erityisesti kovilla äänenvoimakkuuksilla ja voimakkaan basson kohdalla. Tulevia parannuksia ajatellen päällä olevan paneelin eristäminen bassokaiuttimen ilmatilasta olisi ollut hyödyllistä.

## LÄHTEET

- [1] Statista: Bluetooth speaker sales, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 14.10.2019]:  
<https://www.statista.com/statistics/642608/us-bluetooth-speakers-sales/>
  
- [2] JBL BOOMBOX -tuotesivu, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
<https://fi.jbl.com/kannettavat-laitteet/JBL+BOOMBOX.html>
  
- [3] Aiwa Exos-9 -tuotesivu, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
<https://aiwa.co/products/aiwa-exos-9-bluetooth-speaker>
  
- [4] Diamondboxx Model M3 -tuotesivu, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
<https://diamondboxx.com/products/copy-of-diamondboxx-model-l-duratex-black-w-black-anodized-face>
  
- [5] Texas Instruments: TPA3116D2 datasheet, [Datalehti].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
<http://www.ti.com/lit/gpn/tpa3116d2>
  
- [6] Epec – Battery Cell Comparison, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
<https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
  
- [7] Electronicdesign, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
<https://www.electronicdesign.com/power/what-s-better-battery-your-portables-li-ion-or-li-poly#menu>
  
- [8] Orbtronic: Samsung INR18650-35E datasheet, [Datalehti].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
<https://www.orbtronic.com/content/samsung-35e-datasheet-inr18650-35e.pdf>
  
- [9] Y. Barsukov, J. Qian: Battery Power Management for Portable Devices, London: ArtechHouse, 2013. 241 s.  
Saataavissa:  
[https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBPMPD002/viewer-Type:toc/root\\_slug:battery-power-management/url\\_slug:li-ion-li-polymer-charge?=undefined&issue\\_id=kt011LSS62](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBPMPD002/viewer-Type:toc/root_slug:battery-power-management/url_slug:li-ion-li-polymer-charge?=undefined&issue_id=kt011LSS62)

- [10] Alibaba: Akun suojaapiirin INR-62425 tiedot, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 15.10.2019]:  
[https://www.alibaba.com/product-detail/Free-shipping-1pc-6S-24V-25A\\_60839183700.html?spm=a2700.icbuShop.41413.11.71db2e13eVyQ6n](https://www.alibaba.com/product-detail/Free-shipping-1pc-6S-24V-25A_60839183700.html?spm=a2700.icbuShop.41413.11.71db2e13eVyQ6n)
- [11] Soundguys: Was ditching the headphone jack a good idea? [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 12.10.2019]:  
<https://www.soundguys.com/was-ditching-the-headphone-jack-a-good-idea-13825/>
- [12] G. M. Ballou: Handbook for Sound Engineers (4th Edition), Oxford: Focal Press, 2008. 1778 s. Saataavissa:  
<https://nikospapachristou.files.wordpress.com/2013/02/handbook-for-sound-engineers.pdf>
- [13] P. Horowitz, W. Hill: The art of electronics (3rd edition), Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 1192 s.  
Saataavissa:  
<https://www.cambridge.org/us/academic/subjects/physics/electronics-physics/art-electronics-3rd-edition?format=HB>
- [14] S. A. Dyer, B. K. Harms: Advances in Computers, volume 37, Academic Press, 1993. 453 s.  
Saataavissa:  
<https://www.sciencedirect.com/bookseries/advances-in-computers>
- [15] MiniDSP-signaaliprosessorin ominaisuudet, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 20.10.2019]:  
<https://www.minidsp.com/products/minidspkits/2-x-in-4-x-out>
- [16] Loudspeakerdatabase, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 20.10.2019]:  
<http://www.loudspeakerdatabase.com/>
- [17] Crutchfield, speaker glossary, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 20.10.2019]:  
<https://www.crutchfield.com/learn/home-speakers-glossary.html>
- [18] TB-speaker: W6-1139si tuotetiedot, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 22.10.2019]:  
<http://www.tb-speaker.com/products/w6-1139si>
- [19] FaitalPRO: 3FE22 tuotetiedot, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 22.10.2019]:  
[https://fitalpro.com/en/products/LF\\_Loudspeakers/product\\_details/index.php?id=401000101](https://fitalpro.com/en/products/LF_Loudspeakers/product_details/index.php?id=401000101)
- [20] Loudspeakerbuilding: Cabinet material guide, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 25.10.2019]:  
<https://www.loudspeakerbuilding.com/practical-guide/cabinet-materials/10101,en>



- [21] Fablab Tampere: Laserleikkurit, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 25.10.2019]:  
<https://sites.tuni.fi/fablabtampere/laserleikkurit/>
- [22] Analog: Class D Audio Amplifiers, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 26.10.2019]:  
<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-40/number-2/articles/class-d-audio-amplifiers.pdf>
- [23] Audioholics: Amplifier Classes, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 26.10.2019]:  
<https://www.audioholics.com/audio-amplifier/amplifier-classes>
- [24] D. Self: Audio Power Amplifier Design (6th Edition), Lontoo: Focal Press, 2013, 718 s.  
Saataavissa:  
[https://learning.oreilly.com/library/view/Audio+Power+Amplifier+Design,+6th+Edition/9780240526133/029\\_9780240526140\\_chapter20.html#ch20](https://learning.oreilly.com/library/view/Audio+Power+Amplifier+Design,+6th+Edition/9780240526133/029_9780240526140_chapter20.html#ch20)
- [25] Passive Components: Optimizing class-D Audio Amplifier Output Filters, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 17.11.2019]:  
<https://passive-components.eu/optimizing-class-d-audio-amplifier-output-filters/>
- [26] Texas Instruments: Analog Pulse Width Modulation, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 17.11.2019]:  
<http://www.ti.com/lit/pdf/SLAU508>
- [27] EETimes: How Class D Audio Amplifiers Work [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 17.11.2019]:  
<https://www.eetimes.com/how-class-d-audio-amplifiers-work/>
- [28] Maximintegrated: Application note, [Verkkosivu].  
Saataavissa [Viitattu 20.11.2019]:  
<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/6/624.html>
- [29] IRF: Audio Power Amplifier Reference Design, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 20.11.2019]:  
<https://docplayer.net/41705293-lraudamp7s-25w-500w-scalable-output-power-class-d-audio-power-amplifier-reference-design-using-the-irs2092s-protected-digital-audio-driver.html>
- [30] Wikipedia: List of European Medium Wave Transmitters, [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 20.11.2019]:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_European\\_medium\\_wave\\_transmitters](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_European_medium_wave_transmitters)
- [31] Kimmosaunisto: VituixCAD- kaiutinsuunnitteluohjelmiston ominaisuudet [Verkkosivu].  
Saataavissa [viitattu 20.11.2019]:  
<https://kimmosaunisto.net/Software/Software.html>

- [32] E. Winer: The Audio Expert, (1st ed.) Lontoo: Focal Press, 2012. 696 s.  
Saatavissa:  
<https://learning.oreilly.com/library/view/the-audio-expert/9780240821009/>
- [33] T.D. Mast: Helmholtz resonator, McGraw-Hill Education, 2014.  
Saatavissa:  
<https://www.accessscience.com/content/helmholtz-resonator/006400>
- [34] Dayton Audio DSA215 datalehti, [Verkkosivu]  
Saatavissa [Viitattu 18.11.2019]:  
<http://www.daytonaudio.com/index.php/dsa215-pr-8-designer-series-aluminum-cone-passive-radiator.html>
- [35] Dayton Audio DSA115 datalehti, [Verkkosivu]  
Saatavissa [Viitattu 18.11.2019]:  
<http://www.daytonaudio.com/index.php/loudspeaker-components/loudspeaker-drivers-by-type/passive-radiators/dsa115-pr-4-designer-series-aluminum-cone-passive-radiator.html>
- [36] Dayton Audio DCS-165-4 datalehti, [Datalehti]  
Saatavissa: [Viitattu 17.11.2019]  
<http://www.daytonaudio.com/specs/specsheet.php?prod=295-198>
- [37] Vanerikäsikirja, 2005. Metsäteollisuus ry.  
[Viitattu 18.11.2019]  
Saatavissa:  
<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Vanerik%C3%A4sikirja.pdf>